

## **RECONHECIMENTO DE IMAGENS APLICADO A SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DE ALTA PRECISÃO**

### **Luciana Montanari**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [montanar@sc.usp.br](mailto:montanar@sc.usp.br)

### **Jaime Gilberto Duduch**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [jgduduch@sc.usp.br](mailto:jgduduch@sc.usp.br)

### **Carlos Umberto Burato**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [cburato@sc.usp.br](mailto:cburato@sc.usp.br)

### **Arthur José Vieira Porto**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [ajvporto@sc.usp.br](mailto:ajvporto@sc.usp.br)

### **Alan Garcia Santos**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [agsantos@superig.com.br](mailto:agsantos@superig.com.br)

**Resumo.** De maneira geral, o uso de posicionadores em equipamentos de precisão, em particular no posicionamento da ferramenta/peça na usinagem de ultraprecisão, deve-se à necessidade de se obter rígido controle do perfil a ser fabricado. Neste sentido, está sendo desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC-USP um microposicionador angular rotativo capaz de monitorar a posição da ferramenta em relação à peça durante o processo de usinagem e fazer as devidas compensações de erros, além da possibilidade de obtenção de geometrias diferenciadas. Este trabalho visa validar o uso de redes neurais artificiais como ferramenta capaz para o desenvolvimento de um algoritmo de identificação de imagens, baseado no conhecimento, que emprega como elemento multi-sensor, imagens interferométricas, representando posição na ordem submicrométrica. Dentre as principais características a serem alcançadas pelo algoritmo idealizado está a habilidade de identificar a posição de uma superfície sobre o sistema microposicionador angular e, assim, permitir maior rapidez de processamento das informações, possibilitando seu emprego em sistemas de controle em tempo real. A aplicação desta técnica foi avaliada por meio de simulação e apresenta resultados significativos para incentivar pesquisas envolvendo imagens interferométricas.

**Palavras-chave:** posicionadores, projeto de ultraprecisão, interferometria, redes neurais artificiais.

# 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a engenharia de precisão tem promovido grande avanço tecnológico, uma vez que é empregada na fabricação de produtos como elementos óptico-eletrônicos, principalmente das áreas de informática e micro-mecânica, onde alta precisão dimensional e qualidade superficial nanométrica são fundamentais. Por isso é dito que engenharia de precisão é uma área multidisciplinar, já que envolve várias tecnologias, a saber, usinagem de ultraprecisão, metrologia, controle e projeto de máquinas e seus componentes.

Em geral, a forma das peças usinadas é determinada pela posição relativa entre a ferramenta de corte e a peça durante o processo de usinagem. Dessa forma, para alcançar melhores resultados na usinagem, a posição relativa entre a peça e a ferramenta de corte deve ser controlada com compatível grau de precisão, resolução e repetitividade.

Diversos autores estão atentos quanto à resolução do problema do controle da posição relativa ferramenta/peça em processos de usinagem de alta precisão. Soluções variam desde a inclusão de microposicionadores em máquinas já existentes até a concepção e desenvolvimento de novas máquinas aplicando as mais modernas tecnologias e avançados conceitos de projeto, como por exemplo, em Corbett et al.<sup>(1)</sup> e Weck & Day<sup>(2)</sup>.

À problemática do controle de posicionamento de alta resolução, soma-se a necessidade de corrigir erros sistemáticos e atenuar distúrbios presentes no processo de corte. No campo da usinagem de ultraprecisão são usadas pequenas profundidades de corte, juntamente com tolerâncias justas de forma de peças complexas, evidenciando-se a correlação existente entre os erros de seguimento (desvio de trajetória) e a topografia superficial resultante, como mostrado na Figura 1.

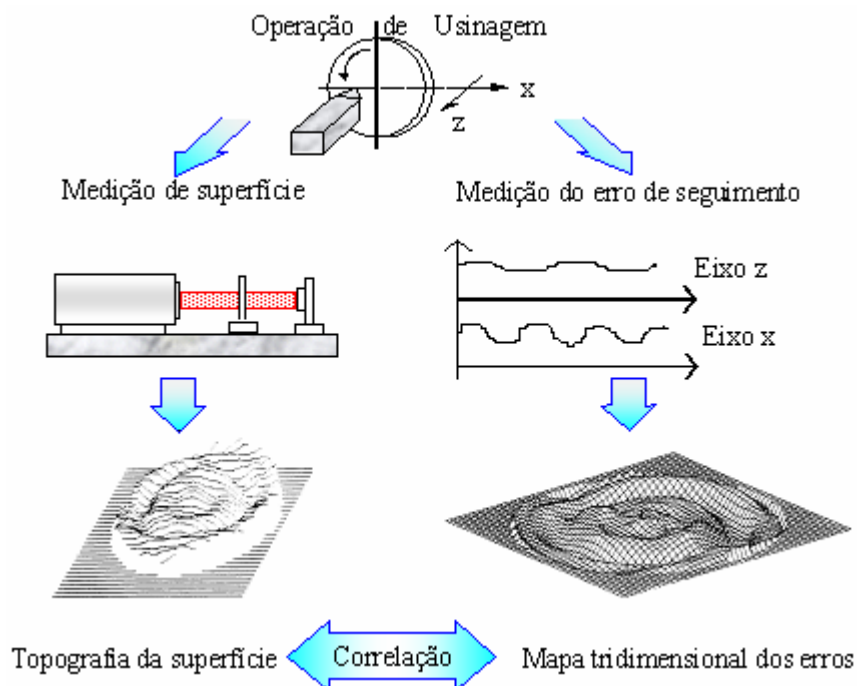


Figura 1. Correlação entre os desvios de trajetória e a topografia da peça (Weck & Bispink<sup>(3)</sup>).

O tipo de problema apresentado na Figura 1 pode ser minimizado, por exemplo, pela correção diretamente na ponta cortante, por meio de controle em tempo real da posição da ferramenta via sinal de deslocamento obtido por um sensor de posição e, acionando diretamente um porta-ferramenta antes e/ou durante o processo, no caso de torneamento (Patterson & Magrab<sup>(4)</sup> e Khono et al.<sup>(5)</sup>). De forma análoga, pode-se alterar a posição relativa ferramenta/peça pela movimentação da própria peça, como por exemplo, num processo de retificação (Mckeown et al.<sup>(6)</sup>). Essa técnica pode ser igualmente usada para a obtenção de formas complexas, as quais dificilmente poderiam ser efetuadas com métodos tradicionais, aumentando assim, a flexibilidade do processo.

Neste sentido, apresenta-se neste trabalho o microposicionador angular rotativo (MAR), desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC-USP, o qual foi projetado segundo conceitos e princípios de projeto de precisão (Duduch et al.<sup>(7)</sup>) com o objetivo de se obter comportamento cinemático satisfatório. Cabe aqui destacar o princípio de funcionamento mecânico do MAR, cujos critérios e justificativas de escolhas foram devidamente estudados por Montanari<sup>(8)</sup>. O sistema é composto, basicamente, por uma base rígida (inferior) e uma base flexível (superior). Essas partes são perfeitamente solidárias, tal que o movimento angular (tipo plataforma de *Stewart*) da mesa superior é originado pelo movimento linear de atuadores piezelétricos (**A** e **B**) que estão fixos à mesa inferior. Os elementos constituintes geram um sistema de microposicionamento angular de alta rigidez e ampla largura de banda, capaz de posicionar uma superfície com resolução inferior a  $4.10^{-5}$  graus, o qual será encarregado de modificar a posição relativa ferramenta/peça durante a usinagem de ultraprecisão, como pode ser visto na Figura 2.

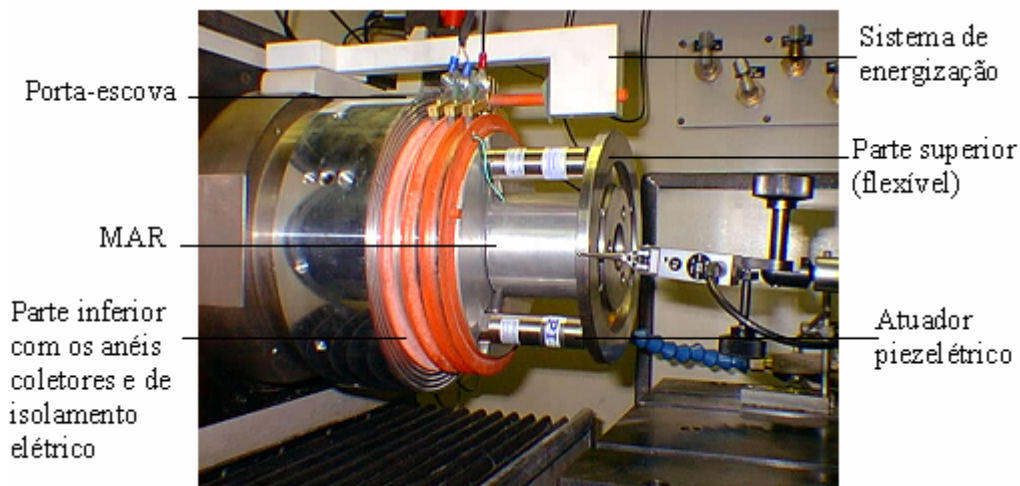


Figura 2. Visualização da montagem do MAR no torno CNC ASG 2500 Rank Pneumo<sup>®</sup>.

Analisando a Figura 2, verifica-se que a eletrificação do sistema se dá por meio de anéis deslizantes que consiste basicamente de uma parte fixa; escovas, que transmitem a energia vinda da fonte de alimentação para a parte móvel, os anéis coletores deslizantes. Esse mecanismo de transmissão de sinal é usado em diversos sistemas eletro-mecânicos que requerem rotações intermitentes ou contínuas, possibilitando a transmissão de potência e/ou dados. Estes componentes caracterizam-se por permitirem melhorar o desempenho mecânico e simplificar o sistema de operação (Litton Poly-Scientific<sup>(9)</sup> e Kaydon Company<sup>(10)</sup>).

## 2. METODOLOGIA

A organização da montagem do sistema (MAR mais interferômetro óptico de Fizeau) para realização dos testes ópticos pode ser vista na Figura 3, cujas notações At. A e At. B designam os atuadores **A** e **B**, respectivamente. Pode-se verificar que o MAR foi fixado a um suporte óptico adequado para testes interferométricos, o qual está fixado à mesa que possui amortecimento pneumático, garantindo a estabilidade do MAR e a atenuação de possíveis vibrações. A obtenção das imagens interferométricas foi efetuada por meio do interferômetro de Fizeau que possui alta resolução ( $31,6 \text{ nm}$ ,  $\lambda/20$  com  $\lambda = 632 \text{ nm}$ ) (WYKO<sup>®</sup> 6000<sup>(11)</sup>).

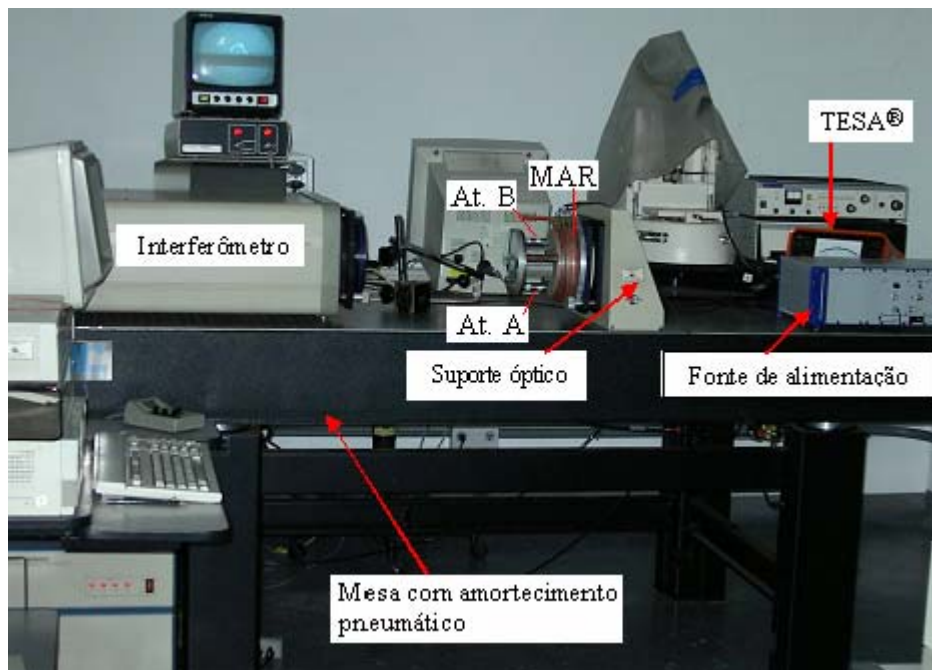


Figura 3. Montagem do MAR para os testes interferométricos.

As rotações e translações presentes na cinemática do mecanismo podem descrever os deslocamentos angulares do MAR em função dos deslocamentos dos atuadores piezelétricos, os quais geram diferentes imagens interferométricas (uma para cada posição). Para isso, foi desenvolvido um modelo matemático baseado em matrizes de transformação homogênea que pode ser visto detalhadamente em Montanari<sup>(8)</sup>.

Para a identificação da imagem gerada foi desenvolvido um algoritmo baseado em redes neurais artificiais competitivas, mais precisamente nos Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen (Kohonen<sup>(12)</sup>). Dentre as principais características a serem alcançadas pelo algoritmo idealizado está a habilidade de identificar a posição de uma superfície sobre o MAR e, assim, permitir maior rapidez de processamento das informações, possibilitando seu emprego em sistemas de controle em tempo real. Alguns dos principais motivos que levaram a essa escolha foram:

- Adequada para trabalhar com imagens;
- Algoritmo robusto, permitindo a obtenção de bons resultados mesmo com falhas nos dados de entrada;
- Possibilidade em trabalhar com atributos binários.

Apesar de Kohonen<sup>(12)</sup> afirmar que uma rede auto-organizável permite a obtenção de bons resultados sem o pré-processamento de dados, neste caso, tal afirmação não se aplica. Por isso, as imagens interferométricas obtidas foram pré-processadas, no entanto, usando o algoritmo proposto não há necessidade de atentar-se para os métodos de contagem de franjas e/ou de fase.

### 3. RESULTADOS

A aprendizagem competitiva é um processo adaptativo onde os neurônios, numa rede neural artificial, tornam-se gradualmente sensíveis a diferentes categorias de entrada e a conjuntos de amostras num domínio específico do espaço de entrada.

Neste caso, a entrada da rede neural consiste em três exemplos de padrões de imagens, geradas por tensões diferentes, aplicadas nos dois atuadores piezelétricos. Dessa forma, para a obtenção de um bom desempenho do sistema, espera-se que o algoritmo seja capaz de identificar qual atuador é o responsável pela imagem gerada e qual a tensão atuante. Para isso, o algoritmo deverá associar um neurônio vencedor para cada padrão de imagem apresentado. A arquitetura do algoritmo usado é constituída por uma função topológica hexagonal com 20 neurônios. Esses neurônios competem entre si segundo o critério de distância Euclidiana, realizando 1000 iterações.

A Tabela 1 mostra o percentual de acerto para cada tensão atuante, bem como os neurônios vencedores.

Tabela 1. Acertos da rede neural.

Tensão [V]	Neurônios Vencedores		Percentagem de Acerto [%]	
	Atuador <b>A</b>	Atuador <b>B</b>	Atuador <b>A</b>	Atuador <b>B</b>
50	20	16	100	100
100	20	1	67	67
150	4	5	67	100
200	4	15	67	100
250	7	13	67	100
300	11	17	67	100
350	19	17	100	100
400	12	2	100	100
450	10		100	
500	8		67	
550	3		100	
600	9		100	

Apesar da percentagem mínima de acerto se apresentar na ordem de 67% para o atuador **A**, nota-se que a rede reconheceu eficientemente qual atuador estava acionado. Quanto às imagens geradas por tensões muito próximas, há uma certa confusão na identificação, provavelmente, se fosse apresentado maior número de dados de entrada, o resultado seria melhor. Além disso, durante o pré-processamento de imagens foi criada uma região de interesse, o que pode ocasionar problemas nessas regiões e, assim, apesar do mapa auto-organizável ser um algoritmo robusto e tolerante à falhas, como é uma comparação *pixel* por *pixel*, pode ter havido perda de informações relevantes à identificação nessas regiões, e ainda, durante a captura da imagem pode ter havido interferência de ruídos mecânicos e/ou acústicos no sistema óptico.

Nota-se que para o atuador **B**, houve maior eficiência na identificação dos padrões de imagens. Justifica-se tal fato pela posição dos atuadores no MAR e a posição do vidro óptico no centro do MAR. As próprias equações cinemáticas são diferentes para os atuadores **A** e **B** e os deslocamentos do ponto central do MAR, quando acionados os atuadores **A** e **B**, também apresentam discrepâncias como mostram testes realizados anteriormente (Montanari<sup>(13)</sup>). Tanto é que analisando a Tabela 1 verifica-se que a variação de tensão nos atuadores é diferente. Além disso, todos os testes experimentais foram realizados em um laboratório com temperatura regulada, sobre uma mesa com amortecedores pneumáticos, no entanto, como o sistema LASER é muito sensível, pode ter havido interferências de vibrações do ambiente e ainda, as tensões de alimentação dos circuitos eletrônicos estão sujeitas às flutuações devido a possíveis variações de tensão da rede nas adjacências do laboratório. a variação angular do atuador **B** é mais acentuada que a do atuador **A**, logo as imagens geradas pelo atuador **B** para tensões muito próximas são mais distintas. No entanto, os resultados apresentados já se mostram significativos para incentivar pesquisas envolvendo imagens interferométricas.

A aplicação de redes auto-organizáveis que emprega como elemento multi-sensor, imagens interferométricas, vai além da identificação de planicidade da superfície em estudo ou verificação de sua concavidade ou convexidade, ela se estende a superfícies sujeitas às irregularidades, ou ainda, a outros tipos de imagens interferométricas que tenham padrões definidos. Para isso, basta mapear amplamente o problema, conhecendo todas suas características e assim, organizar uma base de dados que servirá como referência a outros padrões apresentados.

#### 4. CONCLUSÕES

O uso de posicionadores em equipamentos de precisão, em particular no posicionamento ferramenta/peça em usinagem de ultraprecisão, se deve principalmente à necessidade de obtenção de rígido controle do perfil a ser usinado. Para chegar ao perfil desejado, os eventuais desvios na posição relativa ferramenta/peça durante a usinagem devem ser, preferencialmente, minimizados e/ou compensados, de forma a se obter sucesso no final do processo.

Técnicas modernas e inteligentes de identificação e controle, tais como redes neurais artificiais, apresentam-se como aproximadores universais, capazes de aproximar com precisão arbitrária qualquer mapeamento contínuo definido sobre um domínio compacto. Assim, foi usado um algoritmo baseado nos mapas auto-organizáveis de Kohonen (Kohonen<sup>(12)</sup>) que permitiu identificar, eficientemente, os atuadores acionados e as tensões aplicadas com uma alta percentagem de acerto, sendo que essa margem percentual poderia ser maior se os ruídos (eletrônico, variação da intensidade luminosa e problemas de instabilidade do sistema óptico e mecânico envolvido na medição) fossem reduzidos.

Portanto, pode-se afirmar que o emprego de mapas auto-organizáveis para identificação de imagens interferométricas bem como o processamento de imagens apresentam-se como técnicas promissoras na área de projeto de ultraprecisão, permitindo identificar a superfície em estudo e relacioná-la a padrões pré-estabelecidos. Enfim, os resultados validam o sistema na forma como foi sintetizado e comprovam a viabilidade do uso de imagens interferométricas em sistemas de posicionamento.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CORBETT, J.; STEPHENSON, D.; SWEET, J. & WILLS-MOREN, W. An ultra precision machine tool demonstrating a novel vibration resistant structure. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING AND NANOTECHNOLOGY – 1<sup>st</sup> EUSPEN, Bremen, Germany, 31 May a 4 Jun. de 1999, **Annals of First International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology**, 1999, p. 159 – 162.
2. WECK, M. & DAY, M.. Machine concepts for microcutting with diamond tools. **Industry Diamond Review**, v. 62, n. 594, p. 162 – 169, 2002.
3. WECK, M. & BISPINK, T. Performance analysis of feed-drive systems in diamond turning machining specified test samples. **Annals of the CIRP**, v. 41, n. 1, 1992, p. 601 – 604.
4. PATTERSON, S. R. & MAGRAB, E. B. Design and testing of a fast tool servo for diamond turning. **Precision Engineering**, v. 7, n. 3, p. 123 – 128, 1985.
5. KOHNO, T.; OKAZAKI, Y.; OZAWA, N.; MITUI, K. e OMODA, M. In-process measurement and a work-piece -Referred form accuracy control system (WORFAC): concept of the method and preliminary experiment. **Precision Engineering**, v. 11, p. 9 – 14, 1989.
6. MCKEOWN, P. A.; CARLILE, K.; SHORE, P. & READ, R. F. J. Ultra-precision, high stiffness CNC grinding machine for ductile mode grinding of brittle materials. **Journal of the Japan Society for Precision Engineering**, v. 56, n. 5, p. 30 – 37, 1990.
7. DUDUCH, J. G.; PORTO, A. J. V.; JASINEVICIUS, R. G.; RUBIO, J. C. C. & MONTANARI, L. Projeto de máquinas-ferramenta. In: PORTO, A. J. V.; SILVA, H. A.; DUDUCH, J. G.; RUBIO, J. C. C.; MONTANARI, L.; JASINEVICIUS, R. G.; ALMEIDA, R. M. & SHCROETER, R B. **Usinagem de ultraprecisão**. São Carlos, 2004, Cap. 10, p. 177 – 211.
8. MONTANARI, L. 1999. **Técnicas de projeto aplicadas no desenvolvimento de um microposicionador angular**. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

9. LITTON POLY-SCIENTIFIC. **Products for electrical movement**, Catálogo, USA, 1997.
10. KAYDON COMPANY. **The slip ring group**, Catálogo, USA, 2001.
11. WYKO® 6000. **WYKO CORPORATION**, Manual, 1989.
12. KOHONEN, T. **Self-Organizing Maps**. 3 ed., Springer-Verlag, 2001, 501 p.
13. MONTANARI, L. 2004. **Reconhecimento de imagens interferométricas aplicado a sistemas de posicionamento de alta precisão**. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

## **IMAGE RECOGNITION APPLIED TO HIGH PERFORMANCE POSITIONING SYSTEMS**

### **Luciana Montanari**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [montanar@sc.usp.br](mailto:montanar@sc.usp.br)

### **Jaime Gilberto Duduch**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [jgduduch@sc.usp.br](mailto:jgduduch@sc.usp.br)

### **Carlos Umberto Burato**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [cburato@sc.usp.br](mailto:cburato@sc.usp.br)

### **Arthur José Vieira Porto**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [ajvporto@sc.usp.br](mailto:ajvporto@sc.usp.br)

### **Alan Garcia Santos**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica – Av. Trabalhador São-carlense 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos/SP.

e-mail: [agsantos@superig.com.br](mailto:agsantos@superig.com.br)

**Abstract.** The use of positioning devices compatible with precision equipment, particularly in the positioning of a tool relative to a workpiece in ultraprecision machining, results from the need for absolute control of the dimensions of cut. A microtilt stage is being developed in the Precision Engineering Laboratory of EESC-USP which is capable of monitoring the position of a diamond tool relative to a workpiece, in-process, permitting error compensation and the generation of complex forms.. The use of artificial neural networks as a tool for the development of an algorithm for the identification of images, based on knowledge and employing interferograms as a position multi-sensor element is also presented. One desired characteristic of the proposed algorithm is the ability to perform the identification of the position of a surface on the tilt stage and to permit fast processing of the information, making it possible to use such a system in real time applications. This technique was assessed by simulation and presented significant results, encouraging further researches involving interferometric images.

**Key words:** positioning actuators, ultra-precision design, laser interferometry, artificial neural networks.